

**ANÁLISIS DE LAS VARIACIONES EN LAS PROPIEDADES FÍSICO
MECÁNICAS EN BARRAS DE ACERO CORRUGADO
NANOESTRUCTURADO PARA REFUERZO EN ESTRUCTURAS DE
CONCRETO**

VIVIAN ANDREA BORDA SÁNCHEZ

COD. 503552

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ D.C.

2018

**ANÁLISIS DE LAS VARIACIONES EN LAS PROPIEDADES FÍSICO
MECÁNICAS EN BARRAS DE ACERO CORRUGADO
NANOESTRUCTURADO PARA REFUERZO EN ESTRUCTURAS DE
CONCRETO**

VIVIAN ANDREA BORDA SÀNCHEZ

COD. 503552

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERÍA CIVIL**

ASESOR

ING. JUAN SEBASTIÁN AGUDELO

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ D.C.

2018



Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Colombia (CC BY-NC-ND 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Colombia (CC BY-NC-ND 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



Sin Obras Derivadas — No se puede alterar, transformar o generar una obra derivada a partir de esta obra.

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C. mayo de 2018

Tabla de contenido

INTRODUCCION	9
1. GENERALIDADES DEL PROYECTO	10
1.1. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACION	10
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
1.2.1. DESCRIPCION DEL PROBLEMA.....	12
1.2.2. FORMULACIÒN DEL PROBLEMA.....	14
1.3. OBJETIVOS.....	14
1.3.1. OBJETIVO GENERAL	14
1.3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	14
1.4. DELIMITACIÒN	15
1.4.1. ESPACIO:	15
1.4.2. TIEMPO:	15
1.4.3. CONTENIDO:.....	15
1.4.4. ALCANCE:	15
1.5. MARCO DE REFERENCIA	15
1.5.1. MARCO TEORICO.....	15
1.5.2. MARCO CONCEPTUAL.	19
1.6. METODOLOGIA	22
1.6.1. TIPO DE ESTUDIO	22
1.6.2. FUENTES DE INFORMACIÒN	22
2. HIPOTESIS	23
3. DESARROLLO DE LOS ENSAYOS	25
3.1. ENSAYO A TENSION.....	25
3.2. ENSAYO DE DOBLAMIENTO.....	29
4. RESULTADOS	32

4.1.	ENSAYO DE TENSIÓN	32
4.1.1.	BARRA DE ACERO DIACO	32
4.1.2.	BARRA DE ACERO MMFX	33
4.1.3.	COMPARACION ENSAYO A TENSION	34
4.2.	ENSAYO DE DOBLAMIENTO	35
4.2.1.	BARRA DE ACERO DIACO	35
4.2.2.	BARRA DE ACERO MMFX	35
4.2.3.	COMPARACION ENSAYOS DE DOBLAMIENTO	36
5.	CONCLUSIONES	37
	BIBLIOGRAFIA	38
	ANEXOS	41

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Composición química acero de refuerzo Diaco	23
Ilustración 2 Composición química acero de refuerzo MMFX	24
Ilustración 3 Muestra MMFX Ensayo de tensión.....	25
Ilustración 4 Muestra Diaco Ensayo de Tensión	25
Ilustración 5 Preparación de MTS.....	26
Ilustración 6 Montaje del acero en la MTS.....	26
Ilustración 7 Comportamiento Plástico Muestra MMFX	27
Ilustración 8 Momento de Ruptura Barra Diaco	28
Ilustración 9 Momento de Rotura Barra MMFX.....	28
Ilustración 10 Montaje ensayo de doblamiento Barra Diaco	29
Ilustración 11 Montaje ensayo de doblamiento barra MMFX	29
Ilustración 12 Doblamiento Muestra MMFX	30
Ilustración 13 Doblamiento Muestra Diaco	30
Ilustración 14 Barra Diaco ensayada	31
Ilustración 15 Superficie convexa barra Diaco ensayada	31
Ilustración 16 Barra MMFX ensayada.....	31
Ilustración 17 Superficie convexa barra MMFX ensayada	31
Ilustración 18 Esfuerzo vs Deformación Diaco.....	32
Ilustración 19 Esfuerzo vs Deformación MMFX	33
Ilustración 20 Comparación ensayo a tensión	34
Ilustración 21 Carga vs Deformación doblamiento Diaco	35
Ilustración 22 Esfuerzo vs Deformación MMFX	36
Ilustración 23 Comparación ensayo de doblamiento	36

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Información inicial Diaco	32
Tabla 2 Resultados experimentales Diaco.....	33
Tabla 3 Datos iniciales MMFX	33
Tabla 4 Resultados experimentales MMFX	34
Tabla 5 Datos iniciales de ensayo de doblamiento Diaco	35
Tabla 6 Datos iniciales MMFX	35

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el uso de nanotecnología en las diferentes industrias ha presentado grandes avances, y el sector de la construcción no se ha quedado atrás, observándose la aplicación de esta tecnología en materiales constructivos principalmente, siendo el acero uno de ellos, volviéndolo más resistente y dúctil que el acero actual que se emplea en la construcción, manteniendo sus propiedades resistentes a temperaturas más altas y con una mayor resistencia a la corrosión, entre otras propiedades, lo que permite que la vida útil de estructuras que usan acero como elemento de refuerzo sea mayor.

Sin embargo, y pese a que los resultados positivos que se han observado en el acero nanoestructurado, en Colombia aún no se usa este tipo de tecnología, razón por la cual se quiere realizar la presente investigación, con la cual se analizará el comportamiento de las propiedades físico mecánicas de las barras de acero corrugado nanoestructurado, para determinar que éstas presentan mejoras en las propiedades mencionadas con respecto a las barras de acero corrugado fabricadas y normalmente usadas en Colombia, para así empezar a tenerla en cuenta para su uso en el reforzamiento de estructuras en concreto; para esto se realizarán ensayos que contribuyan con el análisis de la resistencia a fluencia, resistencia a tracción, ensayo de doblado y medición de resaltes, aplicando la normatividad colombiana para el manejo y estudio del acero.

1. GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

En Colombia la aplicación de nanotecnología en el sector de la construcción, presenta cierto rezago, en comparación con otros campos como la salud, la mecánica y la química, ya que el mayor avance se relaciona con los nanomateriales, especialmente la modificación del concreto y cemento con esta tecnología; mostrándose mejoras en la durabilidad y el rendimiento de los componentes y eficiencia energética, así como beneficios medio ambientales, tal y como lo expresa el artículo titulado “Nanotechnology for Building Material”¹ (Nanotecnología para materiales de construcción), en donde sus autores comentan que, investigaciones ha demostrado que los productos generados por nanotecnología tienen muchas características únicas y corrigen significativamente muchos problemas de campo de la construcción, como cambios en las propiedades de los materiales que mejoran sus características, como por ejemplo, en el cemento, donde se han evidenciado adicionalmente, reducción de la tasa de transferencia térmica del material ignífugo y aislante y reducciones significativas de la contaminación por CO₂.

En cuanto al uso de nanotecnología en materiales como el acero, estudios han mostrado mejoras a la resistencia a la fatiga, debido a la carga cíclica, según la investigación de título “Application of nanotechnology in steel industry”², en esta se menciona además que, el uso de nanopartículas de vanadio y molibdeno mejora los problemas de fractura retardada asociados con pernos de alta resistencia, reduciendo los efectos de la fragilización de hidrógeno y mejorando la microestructura de acero a través de la reducción de los efectos de la fase de cementita intergranular.

Así mismo, la investigación titulada “Improving the fatigue life of steel bars by using Nano-coating technology”³ que estudió el efecto del nanorevestimiento en barras de acero en su vida útil, para lo cual se usó óxido de zinc (ZnO) en laboratorios de nanotecnología, el resultado de las pruebas de fatiga mostró que

¹ KHANDVE, Pravin. Nanotechnology for Building Material. En: International Journal of Basic and Applied Research. Enero, 2014. vol. 04, p. 146

² SINGH, Harish; SINGH, K.P.; RAJ, Pankaj y SAI, Akhil. Application of nanotechnology in steel industry [en línea]. Berlin: Research Gate [citado 17 noviembre, 2017]. Disponible en Internet: https://www.researchgate.net/publication/268447216_application_of_nanotechnology_in_steel_industry

³ ALI S., Yasir. Improving the fatigue life of steel bars by using Nano-coating technology. En: International Journal of Engineering & Technology. Enero – marzo, 2014. vol. 3, no. 4, p. 52

su vida puede aumentar hasta cuatro veces más de lo normal, ya que la nanocubierta reduce la capacidad de iniciación y crecimiento de microgrietas en la superficie de la barra de acero que pueden causar la falla de fatiga durante la rotación bajo carga de flexión.

Finalmente, en la investigación “Enhanced mechanical behavior of a nanocrystallised stainless steel and its thermal stability”⁴ (Comportamiento mecánico mejorado de un acero inoxidable nanocristalizado y su estabilidad térmica), se discuten las propiedades mecánicas de un acero inoxidable nanocristalizado obtenido mediante el tratamiento de desgaste mecánico superficial (SMAT) y el mecanismo de refinamiento del grano subyacente utilizando microscopía electrónica de transmisión (TEM), demostrándose que el refinamiento del grano hasta el rango nanométrico tiene el potencial de mejorar significativamente las propiedades mecánicas de un acero inoxidable, volviéndose comparable en fuerza a las aleaciones de titanio. En cuanto al estudio de la estabilidad térmica, los resultados mostraron que la microestructura a escala nanométrica se conserva hasta 600C° y que un tratamiento de recocido controlado incluso podría conducir a la mejora de la resistencia y la ductilidad de este material.

Como se puede observar, el uso de nanotecnología en la construcción, especialmente en el reforzamiento del acero, es un tema que sea venido estudiando desde varias perspectivas y aplicaciones, sin embargo, estas investigaciones se han desarrollado a nivel internacional principalmente, mientras que en Colombia, el estudio de este tema ha sido mínimo, observándose trabajos académicos como el titulado “Evaluación del desempeño del cemento portland tipo III adicionado con nanopartículas de hierro”, desarrollada por una estudiante de la Universidad Nacional de Colombia, cuyo objetivo fue evaluar el desempeño del cemento Portland tipo III en cuanto a su resistencia mecánica y durabilidad al adicionar nanopartículas de hierro (nFe), y con la cual se determinó a partir de la incidencia del nFe en las propiedades físicas (resistencia a la compresión y flexión), químicas y mineralógicas de pastas y morteros a diferentes edades, mejoraban en algunas de las etapas⁵.

⁴ ROLAND, T.; RETRAINT, D.; LU, K.y LU, J. Enhanced mechanical behavior of a nanocrystallised stainless steel and its thermal stability. En: Materials Science and Engineering. September – october, 2007. no A 445, p. 281

⁵ MEDINA CORREA, Ángela María. Evaluación del desempeño del cemento portland tipo III adicionado con nanopartículas de hierro. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Modalidad trabajo de maestría, 2010.

Mientras que un trabajo académico más reciente, realizado por estudiantes de la Universidad Distrital, titulada “Mejoramiento de la resistencia a compresión del concreto con Nanotubos de Carbono”⁶, la cual tuvo como objetivo diseñar una mezcla de concreto adicionada con nanotubos de carbono para mejorar sus propiedades mecánicas de resistencia a compresión, y con la cual se encontró el concreto mejoría en la resistencia a la compresión, dando valores positivos para la implementación a futuro de nanotubos de carbono en concretos súper resistentes.

Pese a lo anterior, no se encontraron investigaciones en Colombia sobre nanotecnología en aceros, y teniendo en cuenta los resultados positivos de las investigaciones mencionadas anteriormente, se quiere realizar el presente trabajo investigativo para analizar el comportamiento de las propiedades físico mecánicas de las barras de acero corrugado nanoestructurado en comparación con las barras de acero usadas en Colombia en reforzamiento de estructuras de concreto, teniendo en cuenta que, en la actualidad el sector de la construcción, requiere materiales más eficientes que proporcionan mayores rendimientos en cuanto a durabilidad, desgastes mecánicos, y resistencia a la corrosión, que es uno de los principales problemas que presenta el acero.

De igual manera, es importante en la labor profesional de ingeniería civil, adentrarse en el campo investigativo, en búsqueda de materiales y tecnologías que mejoren las diferentes obras constructivas, permitiendo una vida útil mayor a las mismas, para que el sector en Colombia sea avance conforme lo hace la industria a nivel internacional.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En construcción uno de los usos que se le da al acero, es como refuerzo en estructuras de concreto armado, el cual depende tanto de la calidad de sus componentes como de su dosificación, para lograr las mejores propiedades que garanticen un período de vida útil prolongado, sin embargo, la interacción con el medio ambiente provoca afectaciones, por ejemplo, en las regiones marinas los

⁶ NAVARRO JIMÉNEZ, Ellerly Alejandro y FORERO ROMERO, Horacio. Mejoramiento de la resistencia a compresión del concreto con Nanotubos de Carbono. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad Tecnológica. Modalidad trabajo de grado, 2017.

principales agentes agresivos son los cloruros, mientras que en zonas rurales e industriales es la carbonatación, y la combinación de los agentes agresivos tiene un efecto sinérgico, acelerando el proceso de degradación de las estructuras de concreto armado. Así mismo, cuando los agentes agresivos no están presentes desde la elaboración del concreto, éstos penetran a través de él cuando la estructura es puesta en servicio. Al llegar a la superficie del metal, provocan que la corrosión se desencadene⁷. Convirtiéndose ésta, en el principal problema que presenta el acero corrugado, y una vez que la corrosión se ha desencadenado, ésta se manifestará bajo tres vertientes:

- ✓ Sobre el acero, con una disminución de su diámetro inicial y por lo tanto de su capacidad mecánica.
- ✓ Sobre el concreto, debido a que al generarse acumulación de óxidos expansivos en la interfase acero-concreto, provoca fisuras y desprendimientos.
- ✓ Sobre la adherencia acero/concreto.

Por tanto, la corrosión se convierte entonces en un fenómeno crítico en el sector, teniendo en cuenta que el acero es el metal más utilizado tanto en construcción de viviendas y edificios como en puentes y otras estructuras, que pueden colapsar por esta problemática, debido al agrietamiento y desprendimiento del material que provoca deterioro general y funcional de la estructura⁸.

Igualmente, la fatiga es un problema importante que puede conducir a la falla estructural del acero sujeto a cargas cíclicas, como en puentes o torres. Esto puede suceder a tensiones significativamente menores que el límite elástico del material y conducir a un acortamiento significativo de la vida útil de la estructura⁹.

De acuerdo con lo anterior, y siendo el acero tan indispensable para la construcción, es que se buscan alternativas que mejoren sus propiedades para que éstas proporcionen mejores condiciones de durabilidad y resistencia para

⁷ DEL VALLE MORENO, Angélica; PÉREZ LÓPEZ, Tezozómoc y MARTÍNEZ MADRID, Miguel. El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado. México: Instituto Mexicano del Transporte, 2010. P. 37

⁸ PAREDES, Josué; PRIETO, Juan y SANTOS, Eduardo. Corrosión del acero en elementos de hormigón armado: vigas y columnas [en línea]. Quito: Espol [citado 18 noviembre, 2017]. Disponible en: <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/24384/1/Paper%20Paredes-Prieto.pdf>

⁹ SURINDER MANN INSTITUTE OF NANOTECHNOLOGY. Nanotechnology and Construction. Reino Unido: European Nanotechnology Gateway, 2006. p.13

las estructuras en las que es usado, siendo la nanotecnología un avance significativo en esta labor, observando casos exitosos, de barras de acero mejoradas con tecnología nano y que ya son usadas en países como Estados Unidos y Chile, y que por tanto, se convierte en una alternativa que puede empezar a implementarse en Colombia, por lo que se requiere iniciar estudios que permitan comprobar las mejoras que puede lograr el acero nanoestructurado en sus propiedades físico mecánicas, y que contribuyan con el refuerzo de las estructuras de concreto.

1.2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Teniendo en cuenta la problemática descrita anteriormente, se plantea la siguiente pregunta de investigación **¿Cómo mejoran las propiedades físico mecánicas de las barras de acero corrugado nanoestructurado de 3/8" de diámetro, a fin de mejorar su vida útil y evitar problemas como la corrosión?**

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar las variaciones en las propiedades físico mecánicas en barras de acero corrugado nanoestructurado de un diámetro, para determinar si éste puede ser usado en el reforzamiento de estructuras de concreto.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Realizar una revisión documental de la normatividad colombiana relacionada con los requerimientos mínimos de las propiedades mecánicas y físicas de barras corrugadas para refuerzo en estructuras de concreto.
- ✓ Preparar las muestras y realizar ensayos de resistencia a tracción, ensayo de doblado y medición de resaltes en barras de acero corrugado nanoestructurado y barras de acero corrugado colombianas.
- ✓ Identificar y analizar las variaciones de las propiedades físico-mecánicas de las barras de acero nanoestructurado y las barras de acero colombianas, de acuerdo con los resultados obtenidos en los ensayos.
- ✓ Determinar de acuerdo a la normatividad vigente en Colombia si el acero nanoestructurado cumple con las características exigidas para su uso en el refuerzo de estructuras en concreto.

1.4. DELIMITACIÓN

1.4.1. ESPACIO:

El estudio está basado en la evaluación del material bajo las normas colombianas, por lo que este estudio y sus resultados solo aplican para territorio colombiano.

1.4.2. TIEMPO:

El estudio se realizó en un lapso de tiempo de 4 meses, tiempo en el cual se realizó diferentes ensayos a las barras de acero corrugado y el respectivo análisis de la información.

1.4.3. CONTENIDO:

Se puede observar información acerca del comportamiento de los aceros corrugados utilizados para el refuerzo de estructuras en concreto; así como el análisis de dos tipos de material fabricados para tal fin

1.4.4. ALCANCE:

Realizar y analizar los ensayos de tensión, doblamiento y medición de resaltes, de acuerdo a la normativa colombiana para los materiales aquí tratados.

1.5. MARCO DE REFERENCIA

1.5.1. MARCO TEÓRICO

1.5.1.1. Acero. Es acero es el nombre que se le dan a las aleaciones de hierro (Fe) y carbono (C), donde el contenido en carbono en disolución sólida en el hierro sea menor del 2,1%. El acero también contiene otros elementos químicos aleantes, hasta alcanzar más de 30, pero entre los que destacan el manganeso, el cromo, el níquel, el silicio, el molibdeno, y el vanadio, etc., que le van modificando sus propiedades de modos muy distintos para permitirlo adaptarlo a las necesidades según el uso. Estas adiciones y tratamientos termo-mecánicos actúan a escala microscópica y nanométrica, alterando la composición tanto general como a escala atómica, la modificando la red cristalina, los tamaños de grano, las inclusiones¹⁰. En ciertos casos basta con la inclusión en concentraciones de pocas decenas de ppms (partes por

¹⁰ UNIÓN DE EMPRESAS SIDERÚRGICAS. Que es el acero [en línea]. Madrid: La Empresa [citado 18 noviembre, 2017]. Disponible en Internet: <https://unesid.org/siderurgia-que-es-el-acero.php>

millón) para modificar radicalmente las propiedades del acero base del que se partía, como es en el caso de algunos aceros denominados microaleados.

1.5.1.2. Clasificación del Acero. Los diferentes tipos de acero se clasifican de acuerdo a los elementos de aleación que producen distintos efectos en el Acero:

- ✓ Aceros al Carbono. Más del 90% de todos los aceros son aceros al carbono. Estos aceros contienen diversas cantidades de carbono y menos del 1,65% de manganeso, el 0,60% de silicio y el 0,60% de cobre. Entre los productos fabricados con aceros al carbono figuran máquinas, carrocerías de automóvil, la mayor parte de las estructuras de construcción de acero, cascos de buques, somieres y horquillas.
- ✓ Aceros Aleados. Estos aceros contienen una proporción determinada de vanadio, molibdeno y otros elementos, además de cantidades mayores de manganeso, silicio y cobre que los aceros al carbono normales. Estos aceros de aleación se pueden sub-clasificar en aceros estructurales, aceros para herramienta y aceros especiales.
- ✓ Aceros De Baja Aleación Ultrarresistentes. Esta familia es la más reciente de las cuatro grandes clases de acero. Los aceros de baja aleación son más baratos que los aceros aleados convencionales ya que contienen cantidades menores de los costosos elementos de aleación. Sin embargo, reciben un tratamiento especial que les da una resistencia mucho mayor que la del acero al carbono. En la actualidad se construyen muchos edificios con estructuras de aceros de baja aleación. Las vigas pueden ser más delgadas sin disminuir su resistencia, logrando un mayor espacio interior en los edificios.
- ✓ Aceros inoxidables. Los aceros inoxidables contienen cromo, níquel y otros elementos de aleación, que los mantienen brillantes y resistentes a la herrumbre y oxidación a pesar de la acción de la humedad o de ácidos y gases corrosivos. Algunos aceros inoxidables son muy duros; otros son muy resistentes y mantienen esa resistencia durante largos periodos a temperaturas extremas¹¹.

¹¹ CASTRO, Guillermo. Aceros. Buenos Aires: Departamento de Ingeniería Mecánica F.I.U.B.A., 2009. p. 87

1.5.1.3. Propiedades del Acero. El acero se caracteriza por sus propiedades metalúrgicas, químicas y mecánicas. Se espera que estos aceros tengan cierta resistencia a la deformación y las características de su producción que los hacen aptos para su uso en estructuras. Las propiedades se establecen a través de aleaciones químicas específicas, las estructuras metalúrgicas y propiedades mecánicas. Éstas se reflejan en la respuesta del material, ya sea un acero de alta resistencia, un acero resistente a la intemperie, o un acero que tiene un determinado tipo de estructura cristalina, por mencionar algunas propiedades que son importantes. Entre sus propiedades se tiene su alta resistencia, homogeneidad en la calidad y fiabilidad de la misma, soldabilidad, ductilidad, incombustible, pero a altas temperaturas sus propiedades mecánicas fundamentales se ven gravemente afectadas, buena resistencia a la corrosión en condiciones normales.

1.5.1.4. Nanotecnología. Se trata de la ciencia dedicada al diseño, la producción y el empleo de estructuras y objetos que cuentan con al menos una de sus dimensiones en la escala de 0.1 milésimas de milímetro (100 nanómetros) o menos. Cuando se manipula la materia a escala tan minúscula presentan propiedades extraordinarias y diferentes a la escala micro o macro. La Nanotecnología permite mejorar ampliamente propiedades como las mecánicas, la estabilidad térmica, la biodegradabilidad y las propiedades barrera de los biopolímeros convencionales¹².

1.5.1.5. Nanotecnología en la construcción. Las nanotecnologías ofrecen un alto potencial para promover innovaciones radicales y de alto valor en la fabricación, propiedades y uso de los materiales de construcción. La nanotecnología facilita materiales más ligeros, resistentes, con menor impacto ambiental e incluso autoadaptables e inteligentes.

Algunas de las líneas de investigación en este campo son:

- ✓ Nanoaditivación de cemento y otros aglomerantes para obtener compuestos que descomponen los compuestos orgánicos volátiles, auto limpiables, antimicrobianos o para incorporar nano sensores que

¹² ITENE. Nanotecnología. México: La Empresa, 2015. p. 1

controlen el estado de las estructuras o la calidad del aire en el interior de los edificios.

- ✓ Materiales aislantes avanzados basados en aerogeles, vidrios nanoporosos o paneles aislados al vacío.
- ✓ Vidrios especiales con propiedades de protección anti incendios, recubrimientos funcionales (por ejemplo, filtradores de radiaciones)
- ✓ Materiales inteligentes que respondan a estímulos como la temperatura, la humedad, la tensión, etc.

A través de la nanotecnología se pueden desarrollar materiales mucho más resistentes que los convencionales.

- ✓ La nanotecnología en el hormigón. La adición de nano-partículas al hormigón puede permitir controlar su porosidad. Reforzando al hormigón con nanotubos de carbono puede incrementarse su resistencia y evitar la propagación de grietas.
- ✓ Nanotubos de carbono. Los "nanotubos de carbono", uno de los múltiples materiales creados por la nanotecnología, son el material más fuerte conocido por el hombre: mientras un cable de acero de alta resistencia de 0.56 milímetros de espesor puede soportar un peso de unos 102 Kg., un cable de nanotubos del mismo grosor puede soportar un peso de hasta 15.3 Toneladas. Se consideran 100 veces más fuertes y resistentes que el acero, y su peso es 1/6 de su peso. Además, conducen la electricidad mejor que el cobre y son buenos conductores de calor¹³.

1.5.1.6. Nanotecnología en acero corrugado. La aplicación de nanotecnología en acero corrugado se ha observado principalmente en el acero MMFX2 (producido por MMFX Steel Corp), siendo altamente resistente a la corrosión, que, aunque tiene las propiedades mecánicas del acero convencional, tiene una nanoestructura modificada que lo hace resistente a la corrosión y es una alternativa al acero inoxidable convencional, pero a un costo menor¹⁴.

El acero Nanoestructurado, se fabrica empleando una nueva tecnología que manipula a nano escala, su estructura durante el complejo proceso de fabricación. Esta nueva tecnología consigue una reducción de tamaño y una mayor uniformidad de los microcristales que se forman, eliminando o reduciendo los defectos en

¹³ DUCHITANGA José. Nanotecnología en la Construcción [en línea]. Bogotá: Universidad Nacional [citado 18 noviembre, 2017]. Disponible en Internet: <http://repository.unad.edu.co/bitstream/10596/6124/1/Nanotecnolog%C3%ADa%20en%20la%20Construcci%C3%B3n.pdf>

¹⁴ SURINDER MANN INSTITUTE OF NANOTECHNOLOGY, Op. cit., p. 14

los cristalitos (de tamaño 100-200 nm). Si se produce alguna microfisura o discontinuidad durante la fabricación, ésta será finísima en anchura y de longitud muy pequeña, abarcando una menor extensión dentro de la masa del acero.

La modificación de la microestructura se produce por la adición de nano partículas autoensamblables (ej. Nano partículas de cobre) en los bordes de los granos de acero. Otra técnica para modificar la estructura del acero haciéndola más compacta, uniforme y prácticamente con ausencia de defectos, consiste en someter al acero a un proceso de deformaciones plásticas severas.

La tecnología de fabricación del acero nanoestructurado está en constante evolución y perfeccionamiento, nuevas aleaciones con la utilización de nano partículas metálicas diversas. Todo este esfuerzo tecnológico permite la mejora continua de las propiedades de los nanoaceros, haciéndolos más eficientes, más resistentes a tracción a la vez que más dúctiles, tenaces y resistentes a la corrosión y la fatiga, además de otras propiedades como: mayores resistencias al frío y al calor, mayores resistencias a esfuerzos dinámicos, por su mayor deformabilidad plástica, mayor resistencia al creep y mayor resistencia al calor $>700^{\circ}\text{C}$.

Los aceros nano estructurados superarán ampliamente el valor 1,5 GPa de resistencia última a tracción, pudiendo llegar a alcanzar el valor de 2,0 GPa. Los aceros nanoestructurados que se fabrican actualmente tienen una resistencia a tracción media de 1236 MPa, una resistencia al corte de 768 MPa y una deformación mínima del 12%, pudiendo llegar a alcanzarse valores del 30%¹⁵.

1.5.2. MARCO CONCEPTUAL.

1.5.2.1. Ductilidad: Se dice que un material es dúctil si tiene capacidad para deformarse sin romperse. La deformación del acero a partir de la fluencia es denominada ductilidad. Gracias a esta propiedad, las estructuras de concreto resultan económicas puesto que ellas se diseñan para que además de poseer suficiente capacidad resistente, tengan capacidad para disipar la energía de deformación que le

¹⁵ CORNEJO, Laureano. Aplicaciones de la nanotecnología a la industria de la construcción [en línea]. Bogotá: Nuevas Tecnologías y Materiales [citado 18 noviembre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: <http://nuevastecnologiasymateriales.com/aplicaciones-de-la-nanotecnologia-a-la-industria-de-la-construccion/>>

impone la fuerza sísmica, mediante su flexibilidad dentro de ciertos límites que corresponden a su deformación. La ductilidad es por tanto seguridad, puesto que por ella se advierten las deformaciones antes del colapso.¹⁶

- 1.5.2.2. Alargamiento: Alteración de la longitud por unidad de longitud original, generalmente expresada en porcentaje.¹⁷
- 1.5.2.3. Deformación elástica: Cuando una carga a tracción se aplica a una probeta de acero esta se torna levemente más larga, pero al retirar la carga la longitud retorna a su dimensión original¹⁸.
- 1.5.2.4. Deformación plástica: La deformación permanece aun cuando se retira la carga¹⁹.
- 1.5.2.5. Resistencia: Es la carga máxima soportada por una probeta sometida a tracción antes de romperse.
- 1.5.2.6. Resistencia a la fluencia: Es la capacidad del material de soportar la deformación plástica, es la carga límite a partir de la cual el comportamiento del material cambia del estado elástico al estado de deformación plástica.
- 1.5.2.7. Punto de fluencia: El punto de fluencia es el primer esfuerzo en un material, menor que el máximo esfuerzo obtenible, en el cual ocurre un aumento de la deformación sin aumento en el esfuerzo. El punto de fluencia está destinado para aplicación sólo con materiales que puedan presentar la característica particular de un incremento en la deformación sin aumento en el esfuerzo²⁰.
- 1.5.2.8. Dureza: Es la resistencia que presenta el acero a ser penetrado. Es variable dependiendo de la composición química del acero.
- 1.5.2.9. Tenacidad: Capacidad de un acero para absorber energía de golpes o deformación. Generalmente se mide cuantificando el trabajo necesario para deformarlo hasta provocar su fractura y dividiéndolo entre el volumen del material deformado²¹.
- 1.5.2.10. Temperatura: Las propiedades mecánicas del acero se afectan de forma dramática por causa del fuego. El aumento de temperatura provoca un incremento de longitud que se expresa mediante la ecuación: $\Delta L = \alpha \Delta T L$, en la que α es el coeficiente de dilatación térmico (1.2×10^{-5} .)

¹⁶ DIACO S.A. Manual del Acero Gerdau Diaco para Construcciones Sismo Resistentes. 3 ed. Bogotá: La Empresa, 2012. p. 26.

¹⁷ Ibid., p.26

¹⁸ Ibid., p.26

¹⁹ Ibid., p.26

²⁰ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Definiciones y métodos para los ensayos mecánicos de productos de acero. NTC 3353. Bogotá: ICONTEC, 1997, p. 8

²¹ MARTINEZ GÓMEZ, Lorenzo, La ciencia para todo, [en línea]. México: Biblioteca Digital ILCE [citado 9 septiembre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/080/htm/sec_10.htm>

- 1.5.2.11. Corrosión: Es una falla en un elemento resultado de un proceso químico en el cual el material reacciona con elementos de su entorno, reacción que altera sus propiedades, reduciendo su dureza, su resistencia mecánica, entre otras²².
- 1.5.2.12. Acero ChrōmX 9100: acero fabricado con la nanotecnología MMFX no forma células microgalvánicas. Esta modificación otorga mayor resistencia, ductilidad, tenacidad y resistencia a la corrosión.²³
- 1.5.2.13. Nanotecnología: Es el estudio y desarrollo de sistemas en escala nanométrica, “nano” es un prefijo del Sistema Internacional de Unidades que viene del griego vávoç que significa enano, y corresponde a un factor 10^{-9} , que aplicado a las unidades de longitud, corresponde a una mil millonésima parte de un metro (10^{-9} Metros) es decir 1 Nanómetro, la nanotecnología estudia la materia desde un nivel de resolución nanométrico, entre 1 y 100 Nanómetrosaprox, hay que saber que un átomo mide menos de 1 nanómetro pero una molécula puede ser mayor, en esta escala se observan propiedades y fenómenos totalmente nuevos, que se rigen bajo las leyes de la Mecánica Cuántica, estas nuevas propiedades son las que los científicos aprovechan para crear nuevos materiales (nanomateriales) o dispositivos nanotecnológicos, de esta forma la Nanotecnología promete soluciones a múltiples problemas que enfrenta actualmente la humanidad, como los ambientales, energéticos, de salud (nanomedicina), y muchos otros, sin embargo estas nuevas tecnologías pueden conllevar a riesgos y peligros si son mal utilizadas.²⁴
- 1.5.2.14. Materiales nanoestructurados: Los materiales convencionales tienen un tamaño de grano que va desde los micrómetros a cientos de milímetros y contiene cientos de billones de átomos cada uno. Con un tamaño de grano nanométrico tan sólo contiene 900 átomos cada uno. Como el tamaño del grano es pequeño, hay un significativo incremento en la fracción de intercaras y fronteras de grano por volumen. Dicho de otra forma, los granos nanoestructurados son entre mil y cien veces más pequeños que los de un material común, y además, dentro del mismo volumen poseen el 0.001 por ciento de átomos.²⁵

²² UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA. Metalografía [en línea], Bogotá: La Universidad [citado 9 septiembre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: <http://blog.utp.edu.co/metalografia/11-analisis-de-falla-de-materiales/#11.3.4.%20Corrosi3n>>

²³ MMFX STEEL, Productos resistentes al paso del tiempo [en línea]. Miami: La Empresa [citado 9 septiembre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.mmfx.com/products/>>

²⁴ [en línea], Obtenido 09, 2017, disponible en <http://www.nanotecnologia.cl/que-es-nanotecnologia/>

²⁵ Cazallas, Jorge. Los materiales nanoestructurados [en línea], 2007, Obtenido 09, 2017, disponible en <https://nanotecnologia.fundaciontelefonica.com/2007/06/27/los-materiales-nanoestructurados/>

1.6. METODOLOGÍA

1.6.1. TIPO DE ESTUDIO

El estudio de esta problemática será cuantitativo y comparativo, esto debido a que se evalúa las características del acero nanoestructurado en comparación con el usualmente comercializado en Colombia se verifican sus posibles aumentos en la calidad, y las conclusiones se basarán en resultados matemáticos obtenidos de los ensayos empleados.

Se evaluarán muestras de cada una de los tipos de acero propuestos y se verificarán sus propiedades mecánicas de acuerdo a los procedimientos especificados en las normas técnicas colombianas vigentes

1.6.2. FUENTES DE INFORMACIÓN

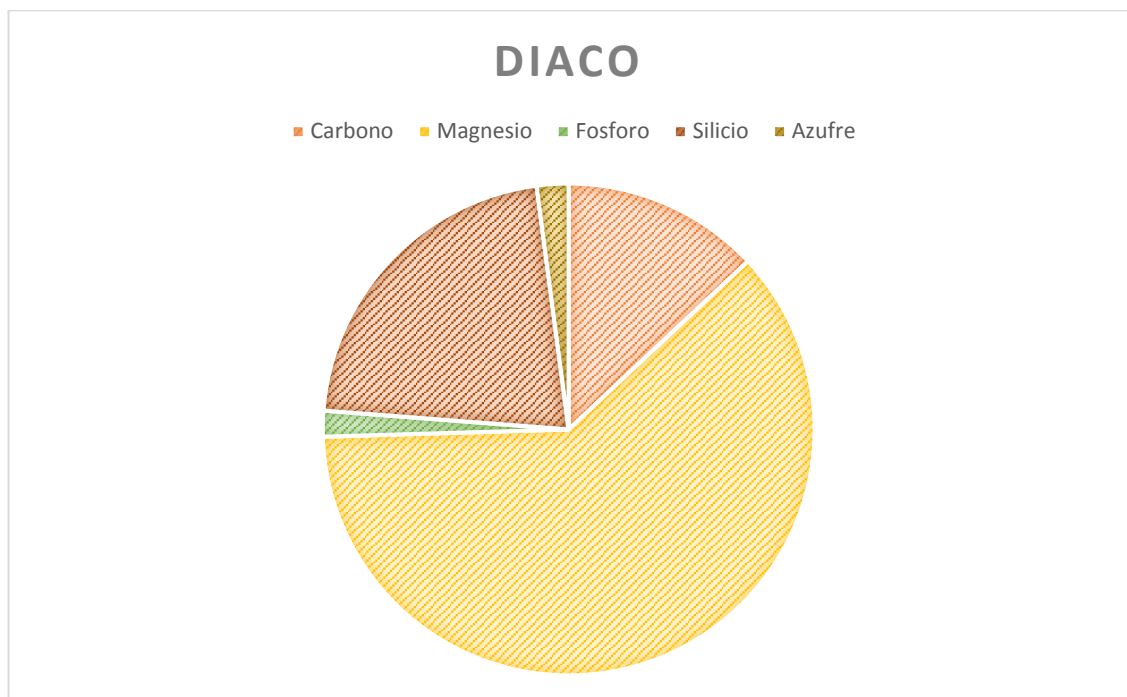
La información necesaria para el desarrollo del presente proyecto de grado fue resultado de la realización de ensayos de laboratorio a los materiales objeto de este estudio, justificando estos datos experimentales con la literatura existente en libros, revistas técnicas e investigaciones anteriores tanto nacionales como extranjeras con referencia al tema a tratar.

2. HIPÓTESIS

Cada uno de los materiales a ensayar, tiene su propia composición química la cual determina en parte su comportamiento mecánico dependiendo del porcentaje contenido de cada elemento químico en la aleación, por lo que es muy importante examinar cada uno de estos con el fin de anticipar en cierta medida cual podría llegar a ser el resultado de los ensayos.

En primera instancia se tiene la barra de acero de refuerzo corrugado marca Diaco, producida en Colombia bajo la normativa NTC 2289, por lo que su composición química es la siguiente:

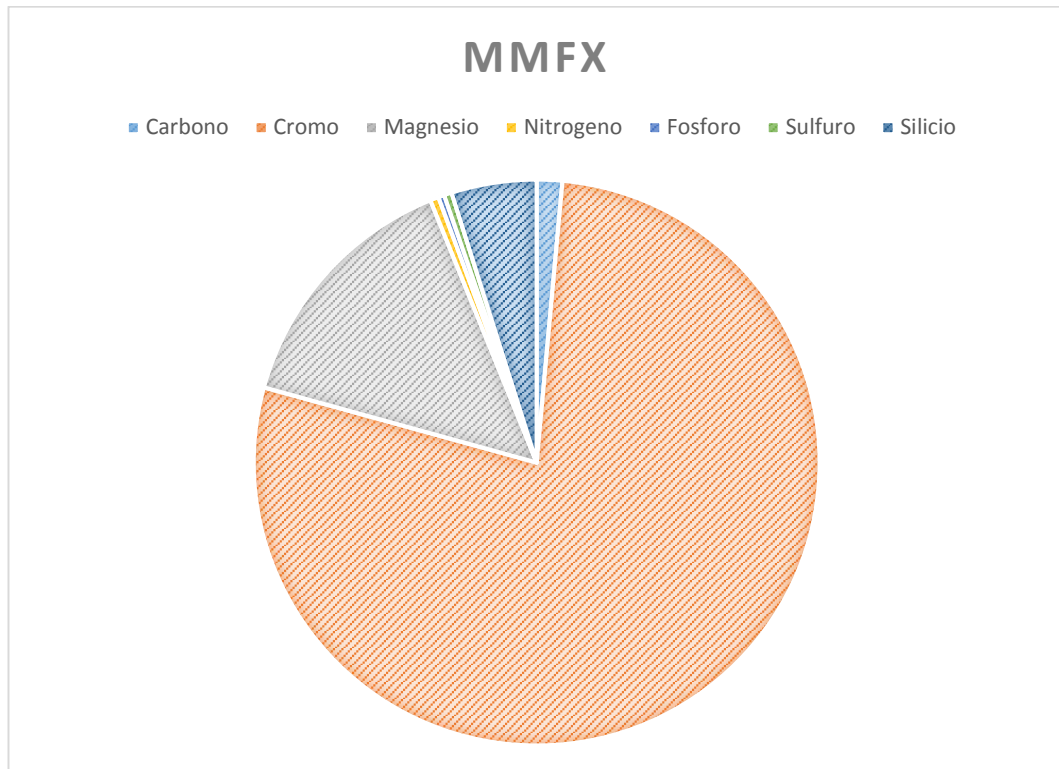
Ilustración 1 Composición química acero de refuerzo Diaco



Fuente: Autor

Como se observa en la Ilustración 1 el magnesio comprende en gran parte la composición del acero, lo que sugiere que el acero tiene mayor dureza y resistencia, en lo cual el silicio es un gran contribuyente pues este a diferencia del magnesio no afecta la ductilidad.

Ilustración 2 Composición química acero de refuerzo MMFX



Fuente: Autor

En la ilustración 2 se puede observar los elementos que componen la barra de acero marca MMFX de fabricación estadounidense; en el cual su mayor componente es el cromo, lo cual generaría un aumento considerable en la dureza y mayor resistencia al desgaste, adicional mayor resistencia a la corrosión.

Por sus componentes como magnesio, carbono, cromo, silicio se esperaría que este acero tuviese mayor resistencia en los ensayos que se realizaran, puesto que estos materiales, aunque en su mayoría disminuyen la ductilidad es decir afectan directamente el porcentaje de alargamiento, en la aleación generan este incremento.

3. DESARROLLO DE LOS ENSAYOS

3.1. ENSAYO A Tensión

Se realiza el ensayo a tensión para las dos muestras de acero corrugado de refuerzo, que en este caso son barras corrugadas de diámetro 3/8" con una longitud de 30 cm, se ejecuta de acuerdo con las normas establecidas en Colombia, en este caso NTC 2289 y específicamente para la ejecución del ensayo la NTC 3353.

Ilustración 3 Muestra MMFX Ensayo de tensión



Fuente: Autor

Ilustración 4 Muestra Diaco Ensayo de Tensión



Fuente: Autor

En primera instancia se realiza la revisión y preparación de la maquina universal para el desarrollo del ensayo.

Ilustración 5 Preparación de MTS



Fuente: Autor

Se realiza el alistamiento del material, se toman los datos de referencia antes de iniciar el ensayo, como lo son diámetros y longitud. Ya con estos datos se procede a realizar el montaje de la barra en el MTS, de modo que el acero este bien asegurado en las mordazas, con el fin de evitar que al aplicar la fuerza se vaya a desplazar, provocando alteraciones en los resultados del ensayo.

Ilustración 6 Montaje del acero en la MTS



Fuente: Autor

Con esto listo se puede dar inicio al ensayo del material, se aplica la carga aumentándola gradualmente, hasta el momento de ruptura, dando registro a cada uno de los valores obtenidos.

En cada uno de los casos se puede evidenciar los cambios físicos que tiene el acero en cuanto se aumenta la carga ejercida sobre este, estos corresponden al comportamiento plástico que tiene el acero antes de su ruptura, como se ve en las siguientes imágenes para cada una de las probetas ensayadas.

Ilustración 7 Comportamiento Plástico Muestra MMFX



Fuente: Autor

Ilustración 8 Momento de Ruptura Barra Diaco



Fuente: Autor

Ilustración 9 Momento de Rotura Barra MMFX



Fuente: Autor

3.2. ENSAYO DE DOBLAMIENTO

Se realiza el montaje de cada una de las probetas de acero de acuerdo con la norma NTC 523, con el fin de determinar la ductilidad del material a ensayar.

Ilustración 10 Montaje ensayo de doblamiento Barra Diaco



Fuente: Autor

Ilustración 11 Montaje ensayo de doblamiento barra MMFX



Fuente: Autor

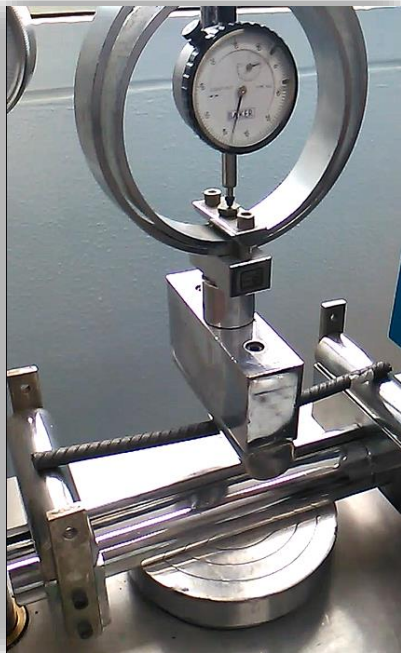
Para cada material se toman los datos iniciales como longitud y diámetro los cuales se representarán en el capítulo siguiente. Una vez hecha la toma de datos inicial se procede con el montaje de la probeta en la máquina y se inicia la aplicación de carga.

Ilustración 12 Doblamiento Muestra MMFX



Fuente: Autor

Ilustración 13 Doblamiento Muestra Diaco



Fuente: Autor

Luego de que se llegue a la carga máxima, se procede con el retiro de las muestras de la máquina, y se detalla que no presenten grietas en la superficie convexa de la probeta ensayada.

Ilustración 14 Barra Diaco ensayada



Fuente: Autor

Ilustración 15 Superficie convexa barra Diaco ensayada



Fuente: Autor

Ilustración 16 Barra MMFX ensayada



Fuente: Autor

Ilustración 17 Superficie convexa barra MMFX ensayada



Fuente: Autor

4. RESULTADOS

4.1. ENSAYO DE TENSIÓN

4.1.1. BARRA DE ACERO DIACO

Para este ensayo se encontraron los siguientes resultados:

- Información inicial

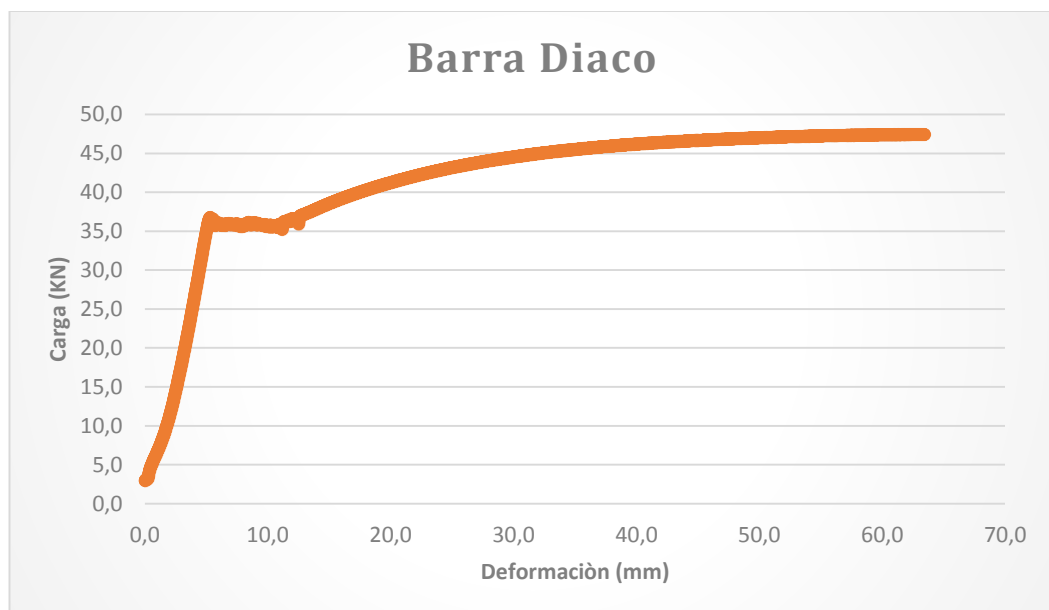
Tabla 1 Información inicial Diaco

M1		
<i>Diam 1</i>	10.44	mm
<i>Diam 2</i>	10.68	mm
<i>Diam 3</i>	10.59	mm
<i>Diam Prom</i>	10.57	mm
<i>Li</i>	0.30	m
<i>Lf</i>	0.34	m
<i>Ao</i>	0.00008775	m ²

Fuente: Autor

- Curva Esfuerzo vs Deformación

Ilustración 18 Esfuerzo vs Deformación Diaco



Fuente: Autor

- Resultados experimentales

Tabla 2 Resultados experimentales Diaco

M1		
Carga máxima:	47.43	kN
% Deformacion	13.33	%
Resistencia a tracción	540.51	Mpa
Módulo de elasticidad	4053.86	Mpa
Reducción de area	69.05	%
Punto de fluencia	36.38	kN
Esfuerzo de fluencia	414.59	Mpa

Fuente: Autor

4.1.2. BARRA DE ACERO MMFX

- Información inicial

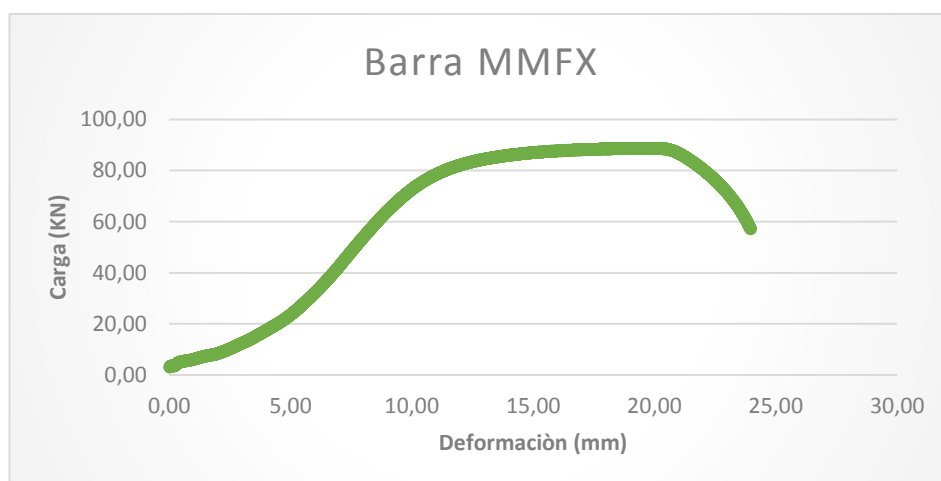
Tabla 3 Datos iniciales MMFX

M2		
Diam 1	9.66	mm
Diam 2	9.80	mm
Diam 3	9.50	mm
Diam prom	9.65	mm
Li	0.30	cm
Lf	0.32	cm
ao	0.00007319	m ²

Fuente: Autor

- Curva Esfuerzo vs Deformación

Ilustración 19 Esfuerzo vs Deformación MMFX



Fuente: Autor

- Resultados experimentales

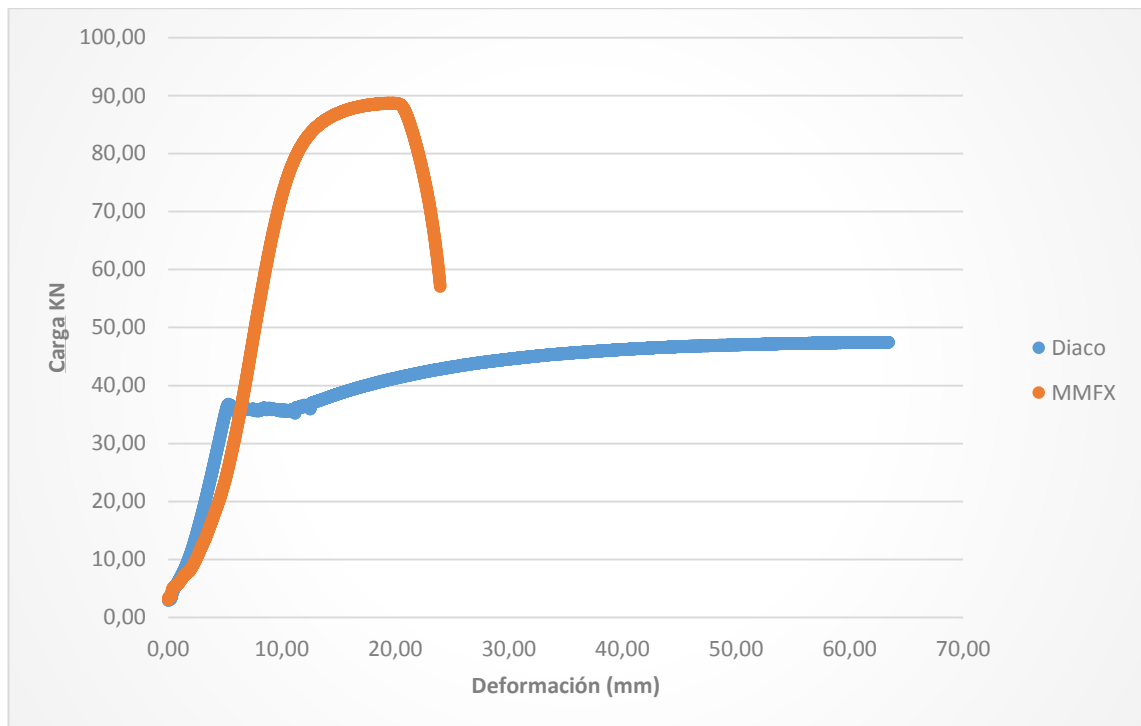
Tabla 4 Resultados experimentales MMFX

M2		
<i>Carga máxima:</i>	88.69	kN
<i>% Deformacion</i>	5.00	%
<i>Resistencia a Tracción</i>	1211.76	Mpa
<i>Modulo de Elasticidad</i>	24235.21	Mpa
<i>Reducción de area</i>	61.37	%
<i>Punto de Fluencia</i>	75.34	kN
<i>Esfuerzo de Fluencia</i>	1029.39	Mpa

Fuente: Autor

4.1.3. COMPARACION ENSAYO A TENSION

Ilustración 20 Comparación ensayo a tensión



Fuente: Autor

4.2. ENSAYO DE DOBLAMIENTO

4.2.1. BARRA DE ACERO DIACO

- Datos iniciales

Tabla 5 Datos iniciales de ensayo de doblamiento Diaco

	M3
$\phi 1$	10.60 mm
$\phi 2$	10.20 mm
$\phi 3$	10.46 mm
$\phi Prom$	10.42 mm

Fuente: Autor

- Curva Esfuerzo vs Deformación

Ilustración 21 Carga vs Deformación doblamiento Diaco



Fuente: Autor

4.2.2. BARRA DE ACERO MMFX

- Datos iniciales

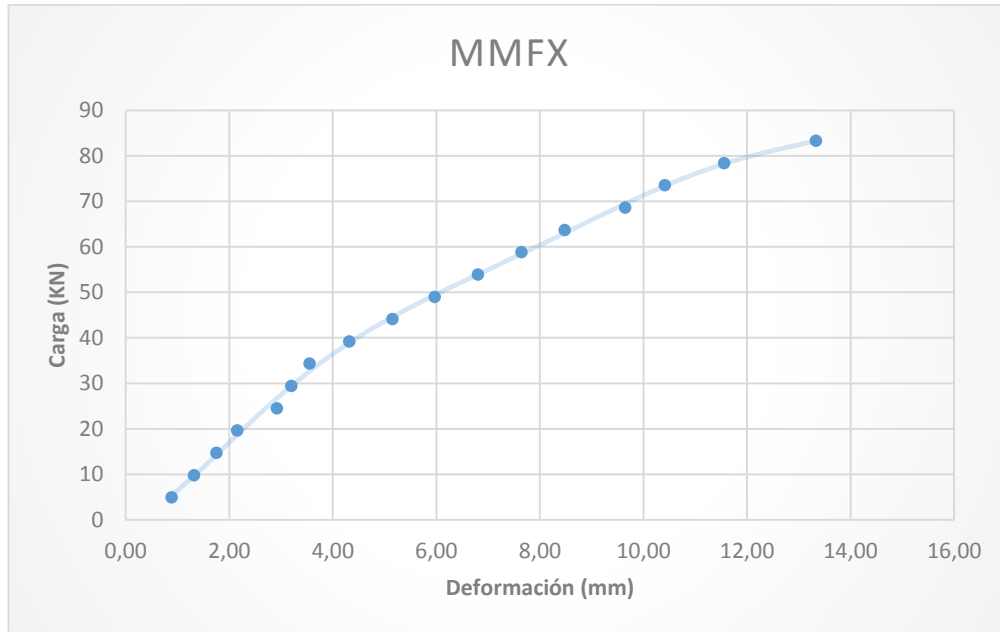
Tabla 6 Datos iniciales MMFX

	M4
$\phi 1$	9.41 mm
$\phi 2$	9.51 mm
$\phi 3$	9.55 mm
$\phi Prom$	9.49 mm

Fuente: Autor

- Curva Esfuerzo vs Deformación

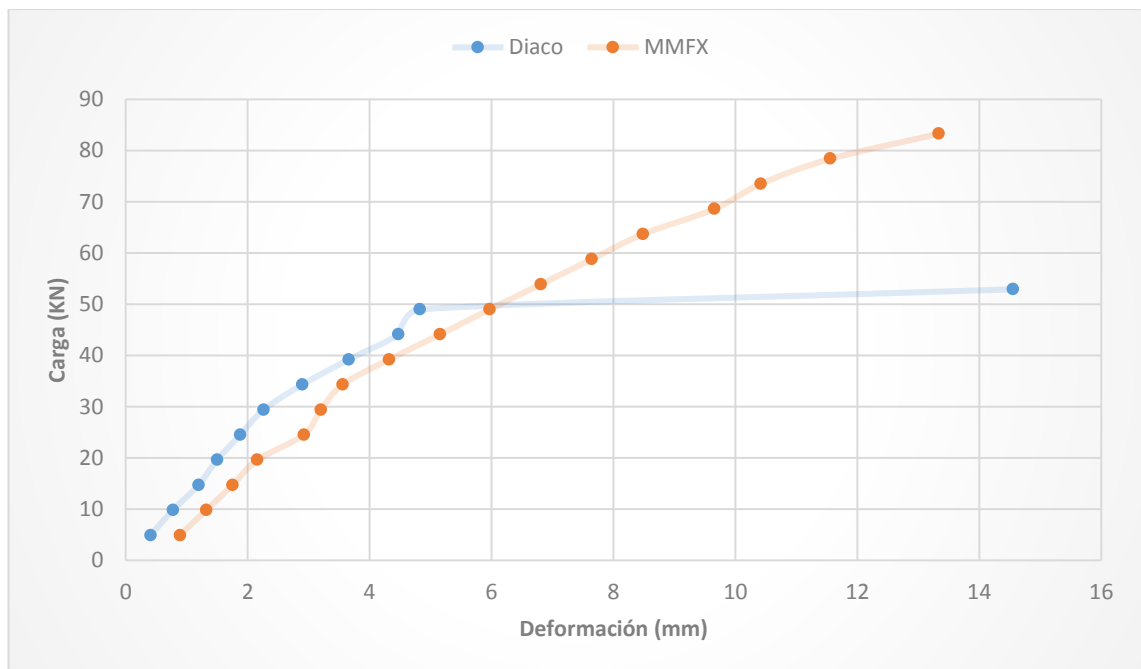
Ilustración 22 Esfuerzo vs Deformación MMFX



Fuente: Autor

4.2.3. COMPARACIÓN ENSAYOS DE DOBLAMIENTO

Ilustración 23 Comparación ensayo de doblamiento



Fuente: Autor

5. CONCLUSIONES

El acero de refuerzo en estructuras de concreto es de gran importancia, debido a que es la combinación perfecta teniendo en cuenta su propiedad de resistencia a la tensión, de la cual el concreto carece en cierta medida. Por lo que es de gran relevancia contribuir al uso de nuevos materiales en la construcción. Por lo anterior se puede evidenciar de acuerdo con los resultados obtenidos, los cuales se encuentran consolidados en las tablas No 2 y No 4, como el acero MMFX resulta tener mejor resistencia a tensión debido a la proporción de sus componentes en la aleación y como asegura el fabricante la microestructura en forma de listón que tiene este acero la cual es modificada en su proceso de producción con nanotecnología es lo que hace que mejore en gran proporción sus propiedades mecánicas.²⁶

Adicional, en el ensayo de doblamiento se evidencia no solo mayor resistencia al doblado por parte de la barra MMFX como lo demuestra la ilustración 23 en que se comparan ambos resultados, sino la capacidad que tiene el material de volver a su estado original como se puede distinguir en la ilustración 16; cabe también notar en la ilustración 17 como la superficie convexa no presenta ningún tipo de grieta que indique la falla del material.

Pese a la evidente superioridad en resistencia del acero MMFX, si se compara con lo exigido por la norma se encuentra que no cumple con los límites con respecto a la composición química, el límite de fluencia y el porcentaje de alargamiento; lo cual podría ser perjudicial puesto que Colombia tiene zonas de alta sismicidad y aunque este resista bastante carga puede que al momento de un sismo falle por no cumplir con la ductilidad requerida.

Por lo anterior se puede concluir que este acero evaluado no es recomendable para ser utilizado como acero de refuerzo en estructuras de concreto en Colombia.

²⁶ MMFX Technologies Corporation, Material properties and design considerations, EEUU, 2012, p.4.

BIBLIOGRAFÍA

ALI S., Yasir. Improving the fatigue life of steel bars by using Nano-coating technology. En: International Journal of Engineering & Technology. Enero – marzo, 2014. vol. 3, no. 4.

CASTRO, Guillermo. Aceros. Buenos Aires: Departamento de Ingeniería Mecánica F.I.U.B.A., 2009.

CORNEJO, Laureano. Aplicaciones de la nanotecnología a la industria de la construcción [en línea]. Bogotá: Nuevas Tecnologías y Materiales [citado 18 noviembre, 2011]. Disponible en Internet: <URL: <http://nuevastecnologiasymateriales.com/aplicaciones-de-la-nanotecnologia-a-la-industria-de-la-construccion/>>

DEL VALLE MORENO, Angélica; PÉREZ LÓPEZ, Tezozómoc y MARTÍNEZ MADRID, Miguel. El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado. México: Instituto Mexicano del Transporte, 2010.

DIACO S.A. Manual del Acero Gerdau Diaco para Construcciones Sismo Resistentes. 3 ed. Bogotá: La Empresa, 2012.

DUCHITANGA José. Nanotecnología en la Construcción [en línea]. Bogotá: Universidad Nacional [citado 18 noviembre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: <http://repository.unad.edu.co/bitstream/10596/6124/1/Nanotecnologia%20en%20la%20Construccion.pdf>>

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, NTC 3353 definiciones y métodos para los ensayos mecánicos de productos de acero, Primera edición, Bogotá D.C., 1997.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, NTC 2289. Barras corrugadas y lisas de acero de baja aleación, para refuerzo de concreto, Décima edición, Bogotá D.C., 2005.

ITENE. Nanotecnología. México: La Empresa, 2015.

KHANDVE, Pravin. Nanotechnology for Building Material. En: International Journal of Basic and Applied Research. Enero, 2014. vol. 04.

MARTINEZ GÓMEZ, Lorenzo, La ciencia para todo, [en línea]. México: Biblioteca Digital ILCE [citado 9 septiembre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/080/htm/sec_10.htm>

MEDINA CORREA, Ángela María. Evaluación del desempeño del cemento portland tipo III adicionado con nanopartículas de hierro. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Modalidad trabajo de maestría, 2010.

MMFX STEEL, Productos resistentes al paso del tiempo [en línea]. Miami: La Empresa [citado 9 septiembre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.mmfx.com/products/>>

NAVARRO JIMÉNEZ, Ellerly Alejandro y FORERO ROMERO, Horacio. Mejoramiento de la resistencia a compresión del concreto con Nanotubos de Carbono. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad Tecnológica. Modalidad trabajo de grado, 2017.

NORTH CAROLINA STATE UNIVERSITY, Evaluation of MMFX steel for concrete bridge decks, Lucier, Gregory, [en línea], Obtenido 09, 2017 https://www.researchgate.net/publication/34226859_Evaluation_of_MMFX_steel_for_concrete_bridge_decks_electronic_resource

NORTH CAROLINA STATE UNIVERSITY, Flexural Performance of MMFX Reinforcing Rebars in Concrete Structures, Yotakhong, Purk, [en línea], Obtenido 09, 2017, disponible en <https://repository.lib.ncsu.edu/handle/1840.16/1449?show=full>

PAREDES, Josué; PRIETO, Juan y SANTOS, Eduardo. Corrosión del acero en elementos de hormigón armado: vigas y columnas [en línea]. Quito: Espol [citado 18 noviembre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/24384/1/Paper%20Paredes-Prieto.pdf>>

ROLAND, T.; RETRAINT, D.; LU, K.y LU, J. Enhanced mechanical behavior of a nanocrystallised stainless steel and its thermal stability. En: Materials Science and Engineering. September – october, 2007. no A 445.

SINGH, Harish; SINGH, K.P.; RAJ, Pankaj y SAI, Akhil. Application of nanotechnology in steel industry [en línea]. Berlin: Research Gate [citado 17 noviembre, 2017]. Disponible en Internet: [URL: https://www.researchgate.net/publication/268447216_application_of_nanotechnology_in_steel_industry]

SURINDER MANN INSTITUTE OF NANOTECHNOLOGY. Nanotechnology and Construction. Reino Unido: European Nanotechnology Gateway, 2006

UNIÓN DE EMPRESAS SIDERÚRGICAS. Que es el acero [en línea]. Madrid: La Empresa [citado 18 noviembre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: <https://unesid.org/siderurgia-que-es-el-acero.php>>

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA. Metalografía [en línea], Bogotá: La Universidad [citado 9 septiembre, 2017]. Disponible en Internet: <URL:<http://blog.utp.edu.co/metalografia/11-analisis-de-falla-de-materiales/#11.3.4.%20Corrosión>>

UNIVERSITY OF SASKATCHEWAN, Comparative Study of the Corrosion Behaviour of Conventional Carbon Steel and Corrosion Resistant Reinforcing Bars, Nedal Mohamed [en línea], Obtenido 09, 2017 <https://core.ac.uk/download/pdf/55300204.pdf>

ANEXOS

- Anexo 1 Ensayo a tensión M1
- Anexo 2 Ensayo a tensión M2
- Anexo 3 Ensayo a doblamiento M3
- Anexo 4 Ensayo a doblamiento M4